

## 자동 형상제어용 측정롤의 특성에 관한 연구

김 순 경(동의공업전문대학 자동차과),\* 전 언 찬, 김 중 완(동아대 기계공학과),\*\*  
김 문 경(부산대 기계설계공학과 대학원),\*\*\* 이 승 수(동아대 기계공학과 대학원)\*\*\*\*

### A Study on Characteristics of Measuring Roll for Automatic Flatness Control

Soon Kyung Kim,\* Eon Chan Jeon, Joong Wan Kim\*\* Moon Kyung Kim\*\*\* Sung Su Lee\*\*\*\*

#### Abstract

The continuing demand for quality products requires better understanding and improved control of the production process. And, in recent year requirements for flatness control in strip rolling have become increasingly severe because of the control for flatness of cold rolled strip is essential for further down stream processing. Also a speeds of rolling mills to meet productivity requirements puts a demanding requirement on the control of flatness of rolled strip. The demands on a total flatness control system therefore are a measuring and indication system consisting of a measuring roll that is robust, accurate, reliable and require a minimum of maintenance.

The critical part of any control system is the quality of the information being provided by the measurement instrument or device. It is therefore of utmost importance to have an accurate, repeatable and reliable measuring system.

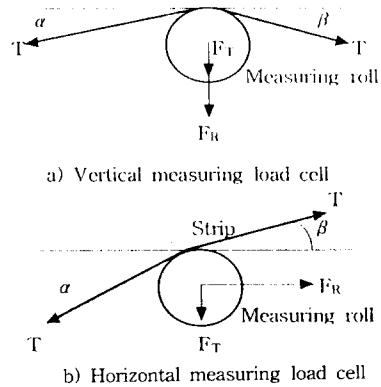
So, in this paper, The measuring roll for automatic flatness control system of contact type has been investigated.

#### 1. 서 론

냉간 압연제품을 사용하는 최종 수요처의 성형 및 가공장치가 자동화되어짐에 따라 강판의 품질에 대한 요구가 날로 다양해지는 추세에 있다. 특히 냉연 강판의 平坦度 개선은 최종 제품을 가공하는 수요자의 요구에 부응하기 위한 필수 조건이 되고 있다. 강판의 형상이 불균일 하게 되는 것은 강판 내부에 잔존하고 있는 응력의 편차 때문에 발생하는 것으로 일반적인 형태는 압연방향의 불균일한 연신이 생기는 것이다. 이와 같은 현상은 작업물의 초기 크라운과 압연 가공에서 생기는 마찰열에 의하여 발생하는 롤의 熱變形에 의한 크라운을 들 수가 있고, 이와 같은 크라운이 적절하지 않을 경우 롤 간극의 형태가 일정하게 유지되지 않고 불규칙적으로 변하게 되어 강판의 연신이 부위별로 다르게 되며, 연신이 발생된 강판에 작용하고 있는 장력을 제거하면 강판에 주름과 비틀림 현상이 생기게 된다. 이와 같은 강판의 형상제어를 수동으로 실시하였으나 최근에는 컴퓨터의 발전과 자동화 기술의 개발로 자동화와 성력화가 급속하게 이루어지고 있다.<sup>1,2)</sup> 자동제어장치가 없는 경우는 제품의 정밀도와 생산성이 떨어질 뿐만 아니라 제조 원가도 높기 때문에 경쟁력 강화 차원에서 자동화가 많이 이루어지고 있고<sup>3)</sup>, 최근에는 두께와 형상 정밀도 향상을 위한 자동두께제어장치<sup>4)</sup>와 자동형상제어장치<sup>5)</sup>를 기본적으로 설치하고 있다.

본 연구에서는 철강분야에 가장 많이 사용되는 접촉식 자동형상제어장치의 가장 핵심이라고 할 수 있는 형상 측정롤의 특성과 응력 측정원리 등을 4단 가역 압연기에서 조사 연구하였다.

#### 2. 형상측정의 기본원리



$\alpha$  : Entry side contact angle,  $\beta$  : Delivery side contact angle,  $T$  : Strip tension,  $F_T$  : Measuring roll & Bearing weight,  $F_R$  : Total vertical & horizontal force

Fig 1 The principle of tensiometer load cell

$$F_R = T (\sin \alpha + \sin \beta) + F_T \quad (1)$$

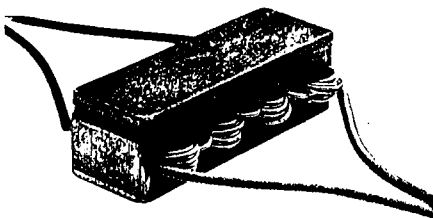
$$F_R = T (\cos \beta - \cos \alpha) \quad (2)$$

강판의 장력에 의하여 형상 측정롤이 받는 하중을 측정하는 원리는 Fig. 1과 Fig. 2에서 보는바와 같다. 강판에 작용하는 수평과 수직분력을 계산하기 위하여 Tensiometer용 로드셀(Load cell)이 사용되어지며 두 개로 구성되었다. 이와 같이 수직력과 수평력을 측정하는 로드셀로 구성되어 있는 장력측정용 Tensiometer는 형상 측정롤(Stressometer)의 양끝 베어링블록 하부에 설치되어 있으며 측정롤 위로 강판이 지나갈

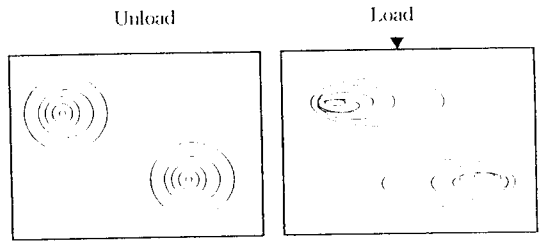
때 하중이 측정되어 지며 로드셀은 설계방법에 따라 수직력과 수평력이 계산되어지게 되어 있다. 강판의 장력을 T라고 하고 측정물과 베어링의 무게를  $F_T$  라하면 구하고자하는 하중  $F_R$ 은 식(1)과 (2)에서 구할 수가 있고 순수한 하중을 계산하기 위하여 측정물과 베어링의 하중은 전차적으로 보상시킨다. 수직력 측정용 로드셀만 사용하면 수평분력이 작용해도 수직력성분의 힘만 장력 측정용으로 사용되어진다. 반대로 수평력 로드셀을 사용하는 경우에는 수직력이 작용한다해도 장력을 측정하기 위한 힘은 수평력 성분이 사용되어진다. Fig. 1에서 접촉각  $\alpha$ 와  $\beta$ 가 일정한 값을 갖는다면, 출력신호는 강판에 작용하는 장력에 완전히 비례하는 값을 얻을수가 있다.

### 3. 변환기(Transducer)의 원리

강판의 형상검출을 위한 장력측정용 로드셀의 기본원리는 강이 받고있는 기계적인 힘에 의하여 강의 자기적 성질이 영향을 받는다는 Magnetoelastic Pressductor원리에 기초를 두고 있다. 변환기의 몸체는 Fig. 2에서 보느냐와 같이 여러장의 철판으로 구성되어 있으며 두꺼운 몸체에는 4개의 구멍이 있다. 몸체의 오른쪽 방향으로 굽혀진 두 개의 코일은 각각 이 구멍을 통하여 감겨져 있다. 한 코일(1차)에는 교류전류가 공급되어지고 다른 한쪽(2차)에는 코일두께에 따라 그 값이 결정되어진다. 따라서 두 개의 코일은 서로가 오른쪽으로 감겨져있기 때문에 두꺼운 몸체에 직접적인 하중이 작용하지 않으면 코일사이에 자기적인 연결이 없게 된다. 그러나 Fig. 2에서와 같이 몸체에 하중이 작용하면 자장의 형태가 바뀌게 되어 강의 透磁率은 힘의 방향에서는 감소되어지고 오른쪽으로 감겨진 방향에서는 증가되어진다. 그 결과 대칭형태의 자기적인 흐름이 변화게되고 흐름의 일부는 2차 권선에 전압을 유발시키게되므로 이 전압은 일정한도의 하중까지는 하중에 비례하여 전압이 발생된다. 따라서 모든 압연용 Tensiometer와 Stressometer의 로드셀은 하중의 변화에 비례하여 전압이 직선적으로 변화 할수 있도록 두꺼운 철판의 수를 충분하게 하여 몸체의 두께를 두껍게한다.

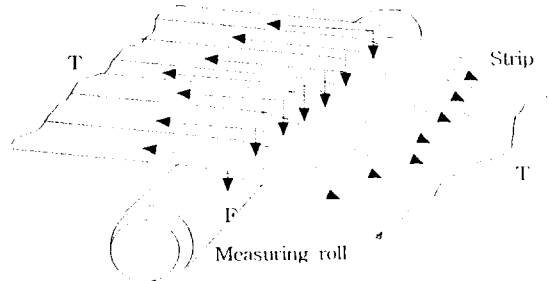


a) The transducer to the left is magnetised via the primary coil.



b) A voltage proportional to the loading force is induced in the secondary coil.

Fig. 2 The measurement principle is based on the magnetoelastic effect, according to which the magnetic properties of a material are influenced by a mechanical load.



$\Delta$ : Strip area (thickness x width) ( $\text{mm}^2$ ), T: Strip tension (N),  $\sigma_0$ : Strip mean stress ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ),  $F_i$ : Measured radial force on zone "i" (N),  $\Delta \sigma_i$ : Stress deviation at zone "i" ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ), L: Strip length (mm),  $\Delta L$ : Elongation length of strip (mm),  $\Delta \sigma$ : Stress deviation ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ), E: Young modulus ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

Fig. 3 Schematic diagram on the measuring roll and distribution of strip tension.

Fig. 3은 강판의 압연공에서 접촉식 자동형상측정장치의 측정물과 강판과의 사이에 작용하는 힘의 분포를 나타낸 것으로 Deflector를 대신에 설치한 형상측정롤상에 있는 강판이 받는 응력은 식 (3)에서 구할수 있다. 식 (4)는 측정롤의 구역 (Zone)별로 다르게 작용하는 힘의 평균값을 나타낸 것이고, 식 (5)는 "i" 번째 구역에 작용하는 응력의 편차를 나타내는 것으로 전체적인 판의 형상을 감안하면 이 값이 (+)인 평균값보다 큰 것을 의미하고 동시에 압연롤의 간극이 크게되어 장력이 많이 작용한다는 것을 나타낸다. 반대로 (-)값을 나타내면 이부분에 장력이 다른부분보다 작게 작용함을 의미하므로 이부분에서 연신이 많이 생겨 물 간극을 크게 해야한다.

따라서 이값은 작업자가 볼수 있도록 화면에 나타내며 이 값에 의하여 물을 냉각시키거나 물 Bending장치를 동작시켜 강판의 형상을 교정하게 된다. 식 (6)은 강판의 연신을 나타내는 L 값을 구하는 식으로서 식 (5)와는 부호가 반대로 된다.

$$\sigma_0 = \frac{T}{A} \quad (3)$$

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n F_i \quad (4)$$

$$\Delta\sigma_i = \frac{F_i - \bar{F}}{\bar{F}} \times \frac{T}{A} = \frac{F_i - \bar{F}}{\bar{F}} \times \sigma_0 \quad (5)$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta\sigma}{E} \times (-1) = I - \text{units (value)} \quad (6)$$

### 5. 형상감출 장치

냉간 압연 강판 가공시 강판의 形狀을 檢出하는 形狀 檢出裝置(Stressometer)의 주요 구성품인 형상 측정롤의 내부에는 104개의 壓力 變換機가 Fig. 4에서 보는바와 같이 90° 각도로 교차된 4개의 홈을 가진 철심에 설치되어있고 그 위를 26개의 링이 덮고 있다. 이 링의 폭 만큼 각 부분들이 독립적으로 형상이 측정될 수 있도록 10μm 정도의 간격을 두고 배열되어 있으며 압력 변환기에 강판의 압력이 잘 전달될 수 있도록 충분한 彈性을 가지고 있다. 링 내부에 설치된 104개의 압력 변환기중 첫번째 변환기는 직렬로 연결되어 있으며 Fig. 5에서와 같이 150V, 2,000 Hz의 전원이 공급된다. 측정롤의 원주 방향에서 보면 네 곳의 측정구역중 두번째 압력 변환기는 다음 측정구역과 직렬로 연결되어 있다. 첫번째 압력 변환기의 입력값과 두번째 압력 변환기의 출력값은 Silver Ring과 Silver Graphite brush로 구성된 슬립링 Unit에 의해 연결되고, 이 슬립 링에는 압력 변환기와 강판의 위치를 일치시키기 위한 펄스 발생기가 내장되어 있으며, 슬립 링에서 조합된 모든 신호들은 전기실에 위치한 제어반에 전달된다. 그리고 여기에 필요한 강판의 폭, 두께, 경도와 장력 등은 압연기와와의 인터페이스 장치로부터 제어반에 입력된다.

냉간 압연 가공에서 강판이 형상 측정롤 위를 통과할 때, 압력 변환기는 각 측정구역에 작용하는 압력을 측정하여 전자 제어반에 전달하고 전달된 이 값은 개별적인 채널(Channel)로 처리되며, 처리과정은 형상의 측정값과 Gain 검출값, 그리고 矯正値와 計算하는 것으로 이루어진다. 형상 측정장치는 입력되는 형상 측정값의 계산을 위하여 구역별로 설치된 4개의 압력 변환기로부터 받은 모든 측정값이 사용되며, 이러한 과정은 강판에 의해 덮여진 모든 측정 구역에서 동시에 진행된다. 선행과정은 최초로 압력 변환기가 형상을 측정할 값이 필요한 형태로 변환되어 적분기에 저장되고, 측정롤이 90° 회전하게 되면 두번째 압력 변환기가 측정할 값을 첫 번째와 마찬가지로 변환하여 첫번째 압력 변환기로부터 적분기에 저장된 값과 합하게 된다. 이러한 과정은 측정롤이 완전히 한바퀴 회전하고 4개의 변환기로부터 모든 신호가 변환된 때까지 진행된다.

고, 적분기에 나타난 값이 4개의 압력 변환기에서 측정된 값의 합을 나타내게 되면 적분기의 값은 중앙 처리 장치에 입력된다. 그리고 적분기는 다시 초기화되어 압력측정기는 다시 강판의 형상을 측정하는 사이클이 반복된다.

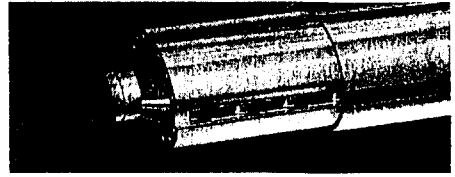


Fig. 4 Measuring roll for cold rolling

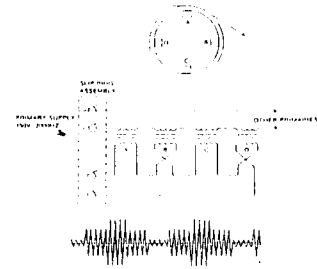


Fig. 5 onnection of transducers and typical output signal

### 6. 자동형상제어장치

본 실험에 사용된 자동형상제어장치의 주요 구성품은 Fig. 6에서 보는바와 같이 강판의 형상을 측정하는 측정롤(Measuring roll ; Stressometer)과 측정된 값을 받아서 형상 교정을 하는 물 Bending장치와 물 냉각장치가 있고 전체를 제어하는 제어장치로 구성되어 있다. 그리고 부대장치로는 판 폭 측정장치인 Strip scanner와 출력측 Recl에 작용하는 장력 측정용 Load cell인 Tensiometer가 있다. 측정롤의 제원은 Table 1과 같고 측정롤은 Fig. 7에서 보는바와 같이 104개의 압력 측정 변환기(Pressure sensitive transducer)가 26개의 슬립링(Slip ring)에 90° 간격으로 4개씩 설치되어 있다. 1차적으로 압력 측정 변환기에 150 V, 2,000 Hz가 공급되지만, 슬립링에 작용되는 강판의 압력에 의하여 펄스로 변환된 값이 출력되어 제어반으로 전송된다. 출력된 이 값은 다른 장치들로부터 받은 강판의 두께와 폭, 그리고 Tension reel의 장력 등을 감안하여 정확한 형상교정량을 검출하게 된다. 그리고 측정롤의 형상측정 주기는 0.02초 이고 물 Bender의 응답성은 0.1초 이므로 냉각장치의 응답성인 0.5초가 가장 늦다. 판 폭 방향으로 측정된 하중을 식 (7)을 사용하여 延伸率 분포로 변환시킨다.

$$I_i = \frac{\Delta\sigma_i}{E} \quad (7)$$

$\Delta\sigma_i$ : 장력분포 (kg/mm<sup>2</sup>), E: Young율 (kg/mm<sup>2</sup>),

$I_i$ : i 번째의 연신율차

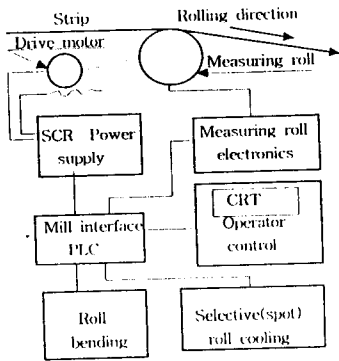


Fig. 6 Outline of automatic flatness control system

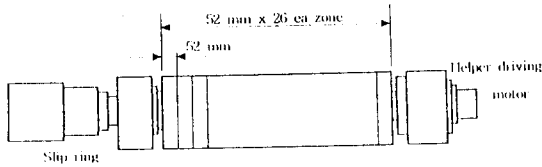


Fig. 7 Measuring roll (Stressmeter)

이 제어장치의 형상을 나타내는 방법은 형상을 검출하는 센서(Sensor)로부터 폭 방향의 연신율  $\beta$ 를 판 폭 방향 좌표 X의 직교함수 관계로 나타낸다. 여기서 0 부터 n 까지의 직교함수에  $\phi_0(X)$ 로부터  $\phi_n(X)$ 까지의 값을 사용하여  $\beta$ 를 나타내고 각 관계함수의 계수  $A_0$  부터  $A_n$  을 사용하여 형상을 나타내면 식 (8)과 같이 된다.<sup>(6)</sup>

Table 1 Specification of measuring roll.

Outside dia.	$\phi 313 \pm 0.5 \text{ mm}$
Measuring zone width	52 mm
Surface hardness	54 $\pm$ 2 HRC
Surface roughness	Ra 0.4 $\mu\text{m}$

$$\beta = A_0\phi_0 + A_1\phi_1 + A_2\phi_2 + \dots + A_n\phi_n \dots \quad (8)$$

$$\sum_i \phi_i \phi_m = 1 \quad (i=1)$$

$$= 0 \quad (i \neq m)$$

i: 판 폭방향의 위치

이 형상을 그림으로 나타내면 Fig. 8과 같은 형태로 나타낼 수 있다.<sup>(6)</sup>

냉간 압연 가공 중 모니터의 중 앙부에 나타나는 수직 막대는 각 링별로 측정된 형상 측정값으로서 응력( $\sigma$ )이나 I unit 값으로 수치화 하여 나타낼 수가 있다

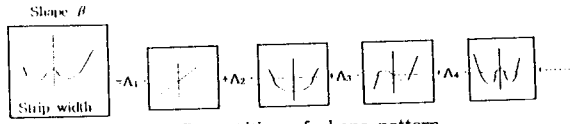


Fig. 8 Recognition of shape pattern.

Fig. 9에서와 같이 모니터가 초기화 되고나면 강판이 형상 측정롤에 접촉되는 구역 수만큼의 막대가 나타나며, 만약 어느 한 구역의 수치가 평균치 보다 높다면 이 부분의 수직막대는 평균선 보다 위쪽에 표시되고 평균치 보다 낮을 경우에는 평균선 아래에 표시된다. 따라서 평균선의 윗부분에 표시되는 막대가 나타내는 값의 합계와 아래쪽에 나타난 막대의 수치를 합한 절대값은 같고, 강판이 압연되는 동안에 데이터는 연속적으로 모니터에 나타나게 된다.

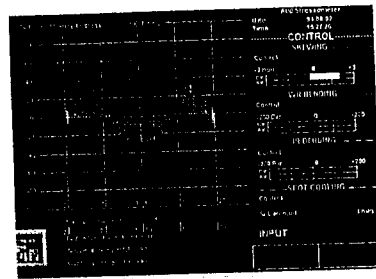


Fig. 9 Main operator's CRT display

## 7. 자동 형상조정장치

### 1) 롤 Bending 장치

강판의 형상을 측정하고 판단하는 정보처리장치는 Fig. 10에서와 같이 가장자리와 중앙부로부터 입력되는 값을 비교하되 전 구역을 비교하지 않고 양쪽 가장자리의 3개 측정구역과 중앙부 5개의 측정구역으로 분할하여 비교한다. Fig. 10의 "A" 구역에서 검출된 강판의 형상에 대한 값과 "B" 구역에서 검출된 값을 합하여 평균값을 구한 다음, 이 평균값을 다시 중앙의 5개 구역에서 구해진 평균값과 비교하여 값의 차가 있을 경우에는 정보처리장치가 출력을 제어하여 양쪽의 값이 일치될 수 있도록 롤 Bender에 작용하는 압력을 증가 또는 감소시키게 된다. 이와 같은 출력제어 값은 적분기에 계속적으로 전달되고 이 값에 대한 제어값의 변화를 보상하기 위하여 강판의 속도와 동기를 갖게 된다.

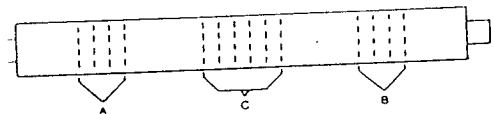


Fig. 10 Zones used for roll bending calculations.

### 2) 롤 Skewing 장치

롤 Skewing 장치는 강판의 단면 형태가 균일하거나 대칭이 되지 않고 한쪽 가장자리의 두께가 두꺼울 경우 압연하중

이 일정하게 강판에 작용될 수 없으므로 냉간 압연 가공 중에 강판의 횡류가 발생되어 볼 사고가 발생된다. 이와 같은 현상 외에도 강판에 Camber가 있으면 형상검출 장치는 강판의 평탄도를 개선하기 위한 압하량을 계산하게 된다. 형상교정에 필요한 압하량은 정보처리장치에서 Fig. 11과 같이 가장자리 "A"와 "B" 구역을 비교하여 이 부분이 같지 않을 경우 출력값이 생성되고 이 값에 의하여 압하량 조절이 이루어지게 된다. 그러나 이 출력값은 "A"와 "B"가 같아질 때까지 반복적으로 계속되며, 이 값은 볼 Bender에 오차가 있을 경우에는 미세한 위치 수정에 사용되기도 한다.

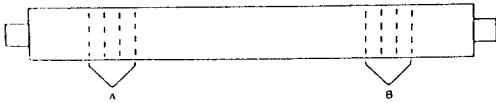


Fig. 11 Zones used for roll skewing calculations.

3) 볼 냉각장치

볼 냉각장치는 냉간압연시에 발생하는 마찰열에 의한 물의 熱的 膨脹에 의하여 볼 간의 형태가 변화되는 것을 강판의 형상이 일정하게 유지될 수 있도록 물의 열 팽창에 의한 부분을 적절하게 조절하는 기능을 한다. 물의 열팽창은 강판의 형상과 직접적인 관계가 있으므로 형상측정 물의 중앙처리장치는 볼 냉각을 위해서 강판에 의해 덮여진 측정볼의 모든 구역으로부터 형상에 대한 정보를 받아서 냉각장치에 사용한다. 따라서 형상 측정볼의 링의 수와 압연유 분사 노즐수가 동일하고 압연유의 噴射量을 조절하는 출력은 26개의 On-off 디지털 값으로 이루어지므로 각 측정 구역마다 한 개의 출력장치가 있다. 작업물의 표면에 분사되는 압연유는 압하력에 의해 생긴 열 때문에 발생하는 강판의 팽창량을 제어하는데도 효과적이다. 압연유는 볼 Bending과 유사하게 물의 크라운을 조정할 수 있고, 볼 bender가 제어 할 수 없는 비대칭적으로 발생하는 Quarter buckle도 Fig. 12에서와 같이 볼 냉각장치는 구역별로 제어할 수 있기 때문에 제어가 가능하다.

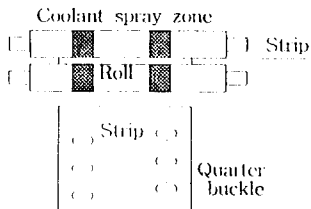


Fig. 12 Schematic diagram for roll cooling system.

4. 결 론

냉간압연제품의 품질향상을 위하여 4단 가역압연기에 설치한 자동형상제어장치를 소개하고, 제어장치별 효과를 측정하여 장치의 특성을 비교함과 동시에 전체제어장치를 사용했을 때의 평탄도 개선과 후공정에 미치는 영향에 관하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 접촉식 형상측정볼을 사용하여 형상을 제어할 경우 볼 Bending장치는 Edge wave와 Center wave의 교정효과가 크다.
- 2) 압연유의 분사량과 분사위치에 의하여 형상을 교정하는 볼 Spot 냉각장치는 물의 직경차이에 의하여 발생하는 Quarter buckle의 교정에 적합하다.
- 3) 냉간강판의 형상교정에서 응답성은 볼 냉각에 의한 형상교정보다는 볼 Bender에 의한 경우가 빠르다.
- 4) 접촉식 자동형상제어장치를 사용할 경우 BAF소둔시 고온에서 발생하는 스티킹의 발생율이 60% 정도 감소되었다.
- 5) 볼 Bender와 냉각장치를 동시에 사용하면 냉간강판의 Wave와 Buckle을 동시에 개선할 수가 있다.
- 6) 냉간압연가공에서 자동형상제어장치를 사용할 경우 형상교정효과는 폭이 좁고 판이 두꺼울수록 크다.

참 고 문 헌

- 1) V. N. Vydrin, V. G. Dukmasov, d. a. Platonov, P.Gurkalov, "Hydraulic automatic gauge control system for 800 strip mill", pp. 118-119, 1981
- 2) Katsuya Kondo, kanji yoshida, Kenji Morita, "Development of a new AGC system for a tandem cold mill", Iron and Steel Engineer, junc, pp.43-48, 1981
- 3) 井浦輝生, 福山 敏, "板壓延の理論と實際", 日本鐵鋼協會, pp 201-220, 1983
- 4) Katsuya Kondo, yoshisuke Misaki, Masaki Okamoto, Yasuno Matsumori, Toshimitsu Miyagi, "A new automatic gauge control system for a reversing cold mill", Technical report, Transactions ISIJ, vol. 28, pp. 507- 513, 1988
- 5) Takeo Nishino, Shoichi Iyama, Toshikazu Kimura, Masaaki Okamoto, Yoshiro Matsumoto, "Automatic Shape Control for Tandem Cold Mill", The Sumitomo Serch No. 41, January pp. 59-70, 1990
- 6) Teruhiro Saito, Takeo Ohnishi, Tomio Komatsu, Sadayuki Miyoshi, Hedeki Kitamura, Masanori Kitahama, " Automatic Flatness Control System in Tandem Cold Rolling Mill for Ultrathin Gauge Strip", Kawasaki Iron and Steel Report, vol.22, no.1, pp. 19-23, 1990